



TITLE:

<講演1> 湯川・朝永両博士が残した宿題

AUTHOR(S):

九後, 太一

CITATION:

九後, 太一. <講演1> 湯川・朝永両博士が残した宿題. 京都大学附置研究所・センターシンポジウム: 京都からの提言-21世紀の日本を考える 2007, 2: 9-28

ISSUE DATE:

2007

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/66384>

RIGHT:

湯川・朝永両博士が残した宿題

基礎物理学研究所長 九後 太一

はじめまして。ただ今、尾池総長からお話がありましたように、湯川先生のノーベル賞受賞を記念してつくられた我が国で初めての全国共同利用研究所であります基礎物理学研究所の、第8代所長を務めております九後でございます。そういう関係で、きょうの講演のトップバッターを仰せつかることになりました。よろしくお願いします。

きょうはこのタイトルでお話をしますが、今年は湯川、朝永両博士の生誕100年にあたります。今、総長のお話にもありましたように、湯川・朝永両博士の活動というものは物理学に限られず非常に広範な範囲にわたっております。戦後の新しい学術体制の構築、あるいは原子力の平和利用、核兵器の廃絶、あるいは文化活動全般にわたって、戦後の日本に非常に大きな影響をお二人の活動は与えました。しかし、きょうの私の話は物理学の話に限らせていただきます。

きょうの話は「湯川・朝永の宿題」というタイトルです。プログラムの概要にも書きましたように、湯川秀樹博士が中間子論という最初の論文を書いたわけですが、それによって素粒子論という学問分野が始まりました。それが40年後に、1970年代の中葉に至りまして、標準理論というものが成立しまして、一応最終的な解決を見たわけです。

その見事な解決に日本人の坂田学派の複合模型と、それから量子電気力学に対して展開された朝永振一郎博士のくりこみ理論というものが本質的な役割を果たしました。

この解決には非常な困難があったのですが、この絶望的とも思えた困難な問題が、1930年代中ごろから1970年代の中ごろまで、たった40年で解決されたことは非常な驚きです。そこら辺の感動といいますか、ストーリーをきょうお話できたらいいなと思っております。それで、さらに両博士が残した宿題とは何かというお話をしたいと思います。

まず、これから湯川、朝永と呼び捨てにしますが、決して尊敬していないわけではありません。

湯川秀樹 1907. 1. 23生	
■ 1926 京都大学理学部入学	■ 1925 ハイゼンベルク量子力学
	■ 26 シュレーディンガーの波動力学
■ 32 湯川スミと結婚	■ 32 大発見の年 中性子、重水素、陽電子、 ハイゼンベルクの原子核理論
■ 35 中間子論 発表	■ 34 フェルミのベータ崩壊の理論
	■ 37 ミュー粒子の発見
■ 40 学士院恩賜賞	
■ 43 文化勲章	■ 47 π 中間子の発見
■ 49 ノーベル賞受賞	

図 1

湯川秀樹は、1907年の1月23日に生まれました。ですから、今年の1月23日がちょうど生誕100年にあたり、京都大学では生誕100年を祝う会を催しましたが、1926年に京都大学の理学部に入学しています。この入学は、朝永、湯川ともに1926年です。この1926年といいますのは、物理学の歴史にとって非常に記念すべき年でありまして、この右側の欄に書いてありますように、1925年および1926年には、ハイゼンベルクとかシュレーディンガーという人たちが、ニュートン以来の物理学の基本的な枠組みを大変革した、革命が起こった年です。

そういう時期に湯川、朝永の二人は大学に入学しているわけです。そして大学を29年に卒業しまして、しばらく京都大学に無給副手として残って彼らは勉強を続けるわけですが、32年には湯川さんは湯川スミさんと結婚します。その32年というのは、実はまた物理学で非常に記念すべき年でありまして、ここに書いてますように、大発見の年、これもまた後で説明しますが、中性子が発見され、あるいは重水素が発見され、陽電子が発見された。それを受けてハイゼンベルクが原子核の理論を始めた。それを受けて、35年に湯川は彼の第1番目の論文「中間子論」というのを発表します。この湯川さんの第1論文が、まさに彼のノーベル賞受賞になった論文なわけです。そこら辺を少し説明します。

今言いましたように1925年、26年といいますのは、この二人、ハイゼンベルク及びシュレーディンガーという人たちが、原子の世界、ミクロの世界は、我々が日常的に経験するマクロな世界とは違って、非常に特異な世界に見えたと、その世界で働いている力学がどういうものであるのか、今日、それを量子力学と呼んでいますけども、そういう新しい力学をつくったのが、25年、26年です。これはハイゼンベルクの行列力学、あるいはシュレーディンガーの波動力学と呼ばれるものです。一言で言いますと、量子力学といいますのは、この自然世界の物質、物質というか、粒子といいますか、存在はすべて粒子であり、同時に波である、というものです。よくわからない概念なんですけど、粒子であり、波であると。

あえて言いますと、波として伝搬し、粒子として現象すると。だから、粒子を観測しますと点粒子として観測されるのですが、実際に空間を伝搬していくときは波として伝搬していく。そういうものであるという認識です。

ですから、この右のほうに図がありますが、原子の周りを回っている電子は、特定のとびとびの軌道だけ許されるのです。電子が波だとしますと、その軌道はその円周の長さがちょうど波の波長の整数倍というところだけが安定な軌道として存在するということで、原子の中の電子の安定な軌道というのが理解できる。というような考え方をするのが量子力学です。

それができたところに、彼ら朝永、湯川はちょうど大学に入学したわけです。それで29年に卒業しまして、しばらくしまして32年に、先ほど言いました、物理学における大発見の年が訪れてまして、先ず中性子の発見です。陽子というプラスの電気を持っている重い粒子は知られていたのですが、その陽子とほとんど同じくらいの質量を持った中性の粒子、それを中性子といいますけど、それが1932年にチャドウィックによって発見されます。さらに、続いて重水素の発見、さらに続いて陽電子の発見と、この年にはいろんな発見が引き続き起こります。中性子の発見、重水素の発見を受けまして、ハイゼンベルク、先ほど延べました量子力学を建設したハイゼンベルクですが、彼がすぐさま原子核の理論を作ります。

ここで今からお話しします話の、世界の大きさというものを皆さんにちょっと理解しておいていただきたいのですが、ここに書きましたように、原子といいますのは中心に原子核というものがありまして、その周りに電子がかなり広がって回っているわけです。この原子の大きさという

量子力学 — ミクロ世界の力学



1925
ハイゼンベルクの行列力学





1926
シュレーディンガーの波動力学

波として伝播(存在)し、粒子として現象する

図 2

1932 大発見の年



中性子の発見: チャドウィック
重水素の発見

→

ハイゼンベルク
原子核構造論

←

陽電子の発見
予言





ディラック電子論

図 3

のは、ここに書いていますように、1メートルの100億分の1、あるいは1センチの1億分の1です。そういう大きさです。ですから、1センチの間隔に原子を並べますと、大体1億個並ぶという、そういう大きさが原子の大きさです。さらに、その原子の中心に原子核というのがありますが、電子はマイナスの電気を持っていますから、この原子核というのはプラスの電気を持っています。この原子核というのは相当重いもので、原子の質量のほとんどすべてを原子核が担っていて、電子は非常に軽いわけです。この原子核の大きさですが、この原子の大きさのさらに10万分の1の大きさです。だから非常に小さい。1センチの10兆分の1です。

この原子核の中に何があるのか、原子核とは何かという問いに対して、このハイゼンベルクが言ったことは、この陽子と中性子というものが固まってできたものが原子核であると。そういう原子核の構造論を出したのです。ところが、こういうふうに原子のさらに10万分の1という非常に小さな領域に非常に固く陽子と中性子が結びつけられているわけですが、そういう力はい体何であるのか、その力は決して電氣的な力ではあり得ないわけです。電氣的な力だとせいぜいこ

れぐらい、電子を原子核が引っ張っているぐらいの、このぐらいの大きさしかあり得ないわけで、しかも中性子は電気を持っていませんから、中性子と陽子を結びつけるなんていう力は全く新しい力のはずです。それを我々は核力と呼びますが、だからこの段階で問題になったことは、核力の起源は何であるのかと。核力って一体何だろうかということが問題になりました。

これに対して答えを与えたのが湯川さんなんですが、そういう原子核の世界を理解する一番最初の仕事をしたのが、このフェルミという人です。フェルミはベータ崩壊の理論を作りました。原子核って世の中にたくさんの種類があるんですが、不安定な原子核というのがあります。たぶん次の代谷先生の話でもあるかもしれませんが、その原子核が不安定な理由は幾つかありますが、一つは先ほどの原子核の中の中性子です。nと書きましたのは中性子（ニュートロン）、pと書きますとプロトン、陽子です。これからそういう記号を使います。それから、eはエレクトロン、電子です。この中性子は陽子と電子とニュートリノというものに勝手に崩壊します。

だから、中性子を単体で置きますと、大体15分くらいで崩壊するんですが、原子核の中にあります中性子も、不安定な原子核の中の中性子は、また勝手に崩壊します。そのベータ崩壊と呼ばれる崩壊を引き起こす相互作用がどういう起源かという事を議論したのがフェルミで、フェルミは、この相互作用は何かこういう図であらわされる相互作用であるということを言いました。

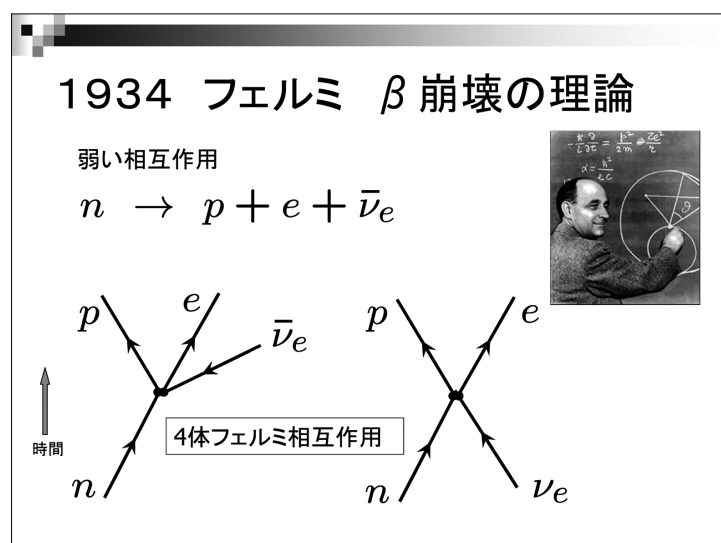


図4

この図の見方ですが、これからもう少しこういう図が出てきますので、少し説明しますと、こういう図をファイマンダイアグラムといいます。ファイマンが直感的に理解するために、こういう図を発明したわけですが、こういう図を書くときに、時間は下のほうから上のほうに進んでいくと考えてください。ですから、この図は、中性子が飛んできて、ある点で陽子に変わる。そのときに、同時に同じ点から電子を放出し、反ニュートリノを放出する。この点であらわされるような、そういう相互作用があるということを、このフェルミという人が初めて言ったわけです。

これは実は、場の理論の言葉で書かれているわけですが、右の図と左の図を比べてください。ニュートリノ ν_e の線が相互作用点で折り返されています。相対論的な場の理論では、粒子の線は自由にぱたんと折り返すことができます。右の図の ν_e の線を折り返しますと、左図のようになりますが、矢印が時間の流れから見て逆方向ですから、反ニュートリノが出来たと解釈します。

右図のように順方向になっていますと、これはニュートリノだと。そういうような理解ができます。ですから、相対論的な場の理論では、粒子があれば必ず反粒子があるということも、この図から理解できるわけですが、それは置きまして、とにかく、この点であらわされるところには四つ粒子が関与してますから、こういう相互作用のことを4体フェルミ相互作用といいます。

この仕事は1934年にあらわれまして、湯川さんは非常な刺激を受けます。実は、実際に彼の着想に至るのは34年の10月ごろなんですけれども、その論文が雑誌に印刷されて出たのは1935年です。湯川さんが提唱した理論がこの中間子論なわけですが、下の左の図はその当時の手書きの草稿です。多分見にくいと思いますけども、ここに電子の質量の200倍というような手書きの文章がありますが、ここで初めて電子の200倍の質量を持った新しい粒子があるということを予言しています。

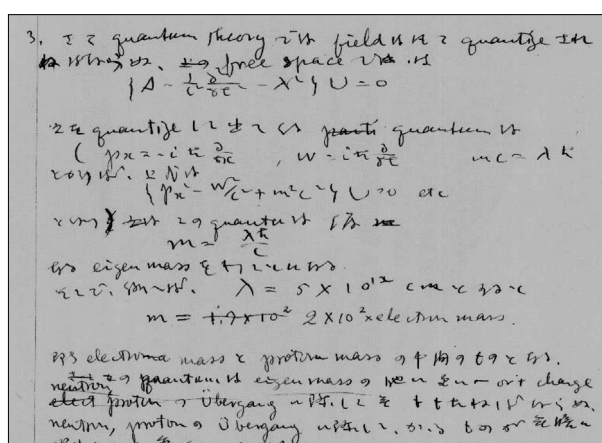


図5

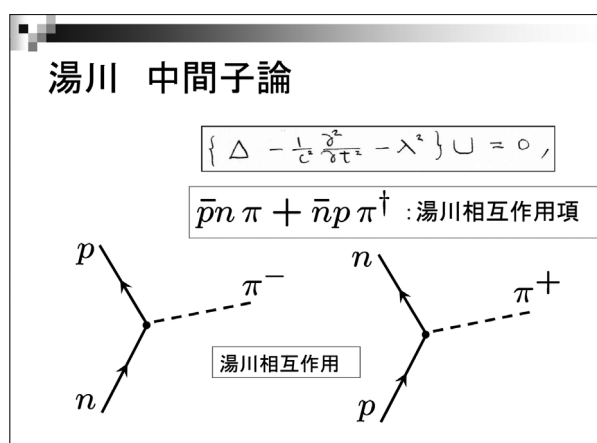


図6

湯川さんのこのノーベル賞の仕事は、実は京都大学の人あまり言いたがらないんですけども、この仕事はなされたのは、彼が大阪大学にいたときでありまして、京都大学の人皆、湯川さんは京都大学の人間だと言ってますけれども、実はこの仕事は大阪大学で行われたんです。このことも今年のこのシンポジウムが大阪で行われている理由の一つであるわけですが、これはあまり強調しません。すでにかなり言いましたけど。

それで、湯川さんの中間子論の基本をなしている相互作用といいますのは、こういう形（図6）です。先ほどの4体フェルミ相互作用は、相互作用点で四つの粒子が関与していましたが、湯川相互作用といいますのは、左のファインマン図のように、中性子がやって来て、ある点で陽子に変わって、その同じ点でパイ中間子を放出するという、こういう3体の相互作用ですね。こういう相互作用のことを湯川相互作用といいます。

彼の理論では、これが基本相互作用であると提唱したわけです。また、相対論的な場の理論を使いますと、必ず図6の右側のファインマン図のような、相互作用点で陽子が中性子に変化し、同時にプラス電気を帯びたパイ中間子が放出される、という相互作用もあることになります。こういう形の相互作用が基本相互作用であるというふうに彼が提唱したわけです。

この基本相互作用を2回使います。すなわち図6の二つのファインマンズ図をくっつけますと、図7のような図ができます。こういう図で、結局中性子がプロトンに変わり、パイ中間子を放出し、その放出されたパイ中間子が、もう一方の陽子に吸収されて中性子に変わる。こういうふうに、中性子と陽子の間でパイ中間子を交換するというプロセスが可能になります。これによって、

中性子と陽子の間に強い相互作用が働くのであれば、強い力が働く、というわけです。

今朝、うちの嫁さんに強い相互作用という言葉を使いましたら、相互作用って何だと言われまして、相互作用と力は同じものであると説明したんですが、私、無意識に相互作用という言葉と力という言葉の両方使いますけれども、全く同じものだと思っていてください。

この中間子を交換しますと力が生じます。この湯川さんは、これだけ言ったんじゃなくて、彼は、この未知の粒子ーパイ中間子ーが存在すると予言したわけですが、この粒子がどういう質量を持つかということも計算しました。それは簡単に言いますと、次のようにできます。

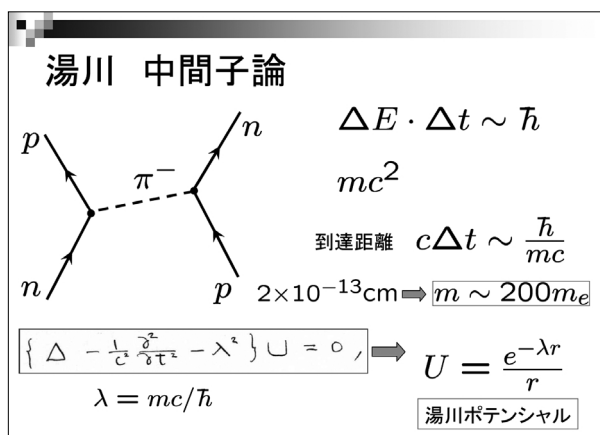


図7

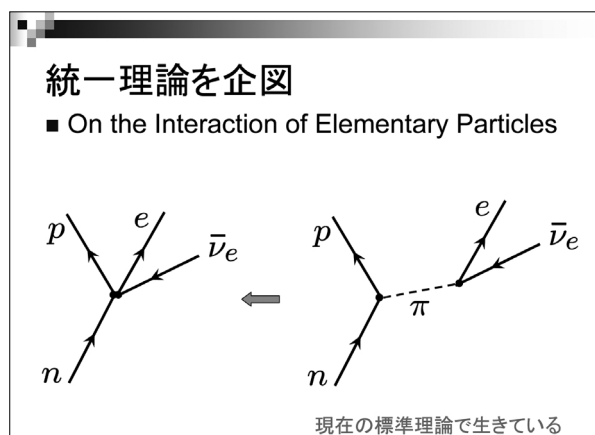


図8

図7のファインマン図の左の相互作用点でパイ中間子を放出するんですが、これはエネルギー保存から許されないわけです。ただでも量子力学に行きますと、エネルギーの揺らぎというのが許されまして、大きなエネルギーの揺らぎは非常に短時間だったら許されると。少しのエネルギーの揺らぎは長い時間許されます。そのエネルギーの揺らぎの大きさ ΔE と、それからそれが許される時間の間隔 Δt の掛け算は、大体 \hbar と記される量子力学のプランク定数という自然定数があるんですけど、その大きさになる、という法則があります。

ここでパイ中間子を放出するときに、パイ中間子が質量を持っていますと、これはすごいエネルギーを持っているわけです。アインシュタインの特殊相対論を使いますと、このパイ中間子が質量 m という重さを持っていますと、それはエネルギーとしては、その m に光速 c の2乗を掛けた mc^2 を持つ。これは世界で最も美しい式と言われているアインシュタインの有名な式ですが、このパイ中間子の質量を m としますと、 mc^2 のエネルギーをこのパイ中間子は持っているわけです。しかし、こんな大きなエネルギーは、エネルギー保存則からは許されませんが、エネルギーの揺らぎとしては許されるわけで、このエネルギーの揺らぎが許される時間間隔は、エネルギーの揺らぎ $\Delta E = mc^2$ 掛ける時間間隔 Δt 秒が \hbar で決まる。そうすると、この c の2乗というのは c 掛ける c ですから、 c 掛ける Δt は、それ掛ける mc が \hbar ですから、この mc を1個右辺の分母に持っていきますと（中学校のときに移項するとか習いましたが、 mc を右辺へ持っていきますと、分母に行きます）、 $c \times \Delta t$ イコール mc 分の \hbar 。これは式を使っていると怒られそうですけど、これ位は大した式じゃないですよ。それで、この式の意味ですけども、このパイ中間子が光速 c で許される時間、 Δt 秒間進んだとしますと、 $c \times \Delta t$ だけの距離を動けるわけです。それだけこの揺らぎの時間を利用して、このパイ中間子が、ここからここまで飛んだと。飛んで相手側の中性子に吸収されてしまいますと、パイ中間子はなくなりますから、エネルギーの

揺らぎは、そこでなくなるわけです。そうしますと、ちょうどこの c 掛ける Δt 秒、これだけの距離、このパイ中間子は飛ぶことができますから、そこで、この力の到達距離は、この大きさです。それがこのパイ中間子の質量 m を使って、 mc 分の \hbar バーだと言っているわけです。 c は光速で、 \hbar バーはプランク定数という自然定数ですから、これらはわかっている量です。

一方、この到達距離も、原子核の大体の大きさが、先ほど言いましたように、原子の大きさの10万分の1の大きさだということがわかってますから、この到達距離はその大きさです。ファクターまで正しく書いて、2掛ける10のマイナス13乗センチだという到達距離であるとしみますと、この m が逆に計算できるわけです。この式を使って計算しますと、大体パイ中間子の質量 m は電子の質量 m_e の200倍である、という計算ができます。これによって、彼は未知の粒子パイ中間子がおおよそ電子の質量の200倍だという予言をすることができたわけです。

実際のところ、彼はこの式を使ってないんで、彼はもっと高級な図7左下の式、これは湯川先生の自筆の式ですけども、パイ中間子が従う場を U と記した彼自筆のこの式を使ってやったんです。が、まあ、いいことにしまして、こういう式から基本的に同じような結論を得たわけです。

それから、さらに強調しておきたいのは、彼の第1論文のタイトルです。「On The Interaction of Elementary Particle」という、こういう題名で、訳しますと、Elementary Particleは素粒子ですね。素粒子のInteraction、相互作用について、です。だから、これは非常に簡単な題名です。「素粒子の相互作用」についてという。

大体、世の中にあらわれてます論文のタイトルは、もっともっと詳細なタイトルが多いのです。もっと、何を研究しているかということを非常にはっきりと、これこれこういう特定の物質のこれこれの性質について、だとか、ものすごく細かいタイトルが多いんですが、彼のこの第1論文は、素粒子の相互作用についてという、ものすごく大きなタイトルです。このタイトルが示しますように、彼は単に原子核の中の強い力の起源を理解しようというだけじゃなくて、素粒子のあらゆる相互作用、あらゆる力を統一的に理解したいと。そういう非常に大きなスコープのもので書かれた論文です。

実際に、彼の第1論文では、この強い相互作用だけではなくて、先ほど言いましたフェルミのベータ崩壊の理論、あれは強い力じゃなくて弱い力なんですけども、あの力はフェルミの理論では、こういう4体相互作用でした。この中性子が陽子に変わって、同時にその点で電子と反ニュートリノを放出する。こういう相互作用だったんですが、これに対して湯川さんは、これは基本的な相互作用ではなく、むしろこれは図9の右のファインマン図のように起こっているんだと言ったわけです。

すなわち、ここの中性子が陽子に変わって、そこでパイ中間子を放出すると。これは今さっき言いました基本的な湯川相互作用です。このパイ中間子がさらに飛んでいって、同時に電子とニュートリノに対しても、こういうふうに相互作用すると考えますと、このパイ中間子の交換によって中性子が陽子と電子とニュートリノに崩壊できます。しかもパイ中間子は非常に重いので飛べる距離はものすごく短いわけです。そうすると、この広がり、この3体相互作用の2点の離れ方というのは外から見てみるとわからないわけで実質的に1点と思えます。そうすると、左側の図になります。したがって、このフェルミが言った弱い相互作用も、この湯川さんの基本的な3点相互作用がエレメンタリー、素過程であって、これを繰り返すことによって、4体相互作用のこういう図として弱い相互作用も同時に理解できるということをこの第1論文で書いています。

ところが、残念ながら、このアイデア自身は実はうまくいかなかったのですが、現在の理論で

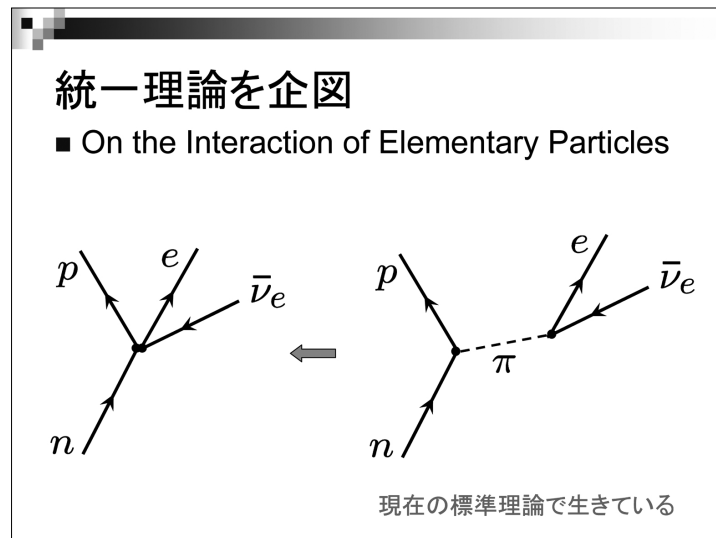


図9

も、このパイ中間子の交換じゃなく、後で言いますゲージ場というものの交換によって、こういう相互作用が起こるんだという理解で、アイデアとしては基本的に現在でも生きております。

それで、初めの方でお見せした図1の後半の部分を言いたいんですが、そういうふうに、1935年に中間子論を発表するわけですが、湯川先生というのは本当に運の強い人です。運も実力のうちと言いますから、もちろん湯川先生本当に偉いわけですが、この35年に中間子論を発表しまして、すぐさま37年、2年後に、宇宙線の中にミュー粒子というものが発見されます。このミュー粒子は、湯川さんの予言した電子の200倍の質量を持つパイ中間子とほとんど同じ質量なので、当初、湯川さんの予言した粒子であると思われたわけです。それでいろいろ実験が進むんですが、どうも調べていくと、湯川さんの予言した性質と違うということがわかってくるんです。が、とにかく、世界中で新たにその宇宙線の中に発見された電子の200倍ぐらいの質量を持った粒子が、果たして湯川の予言した中間子なのか、あるいは、それとは別なのか、一体何なのかということが世界中で議論され始めます。そのときに、とにかく議論の軸になるのは、湯川の予言ということでして、これで一挙に湯川さんの名前が世界的に有名になります。

それで、その後、このミュー粒子というのは、後で言いますけども、強い相互作用はしないので、湯川さんの予言したパイ中間子とは違うことがわかります。実際にパイ中間子はこれから10年後、47年に発見されます。実は、このミュー粒子というのは、湯川さんの予言したパイ中間子が非常に不安定でありまして、このパイ中間子が宇宙線の中にできると、すぐさまこのミュー粒子に崩壊しまして、それを見ていたわけです。パイ中間子が47年に発見されまして、その2年後に湯川さんがノーベル賞を受賞したということです。

不思議なことに、湯川さんは、このパイ中間子が47年に発見される以前に、43年に既に文化勲章を受けています。これは長い間、僕はなぜだろうと思っていたんですが、これは大変なことですね。本当に予言した粒子が見つかってない段階で、こういう大きな賞を与えるというのは、もし間違っていれば、その賞の権威にかかわるわけで、非常に大胆なことなんです。これはやはり時代背景がありまして、43年というのは、実は戦時中です。このとき既に湯川先生は世界的な学者でありまして、先ほど言いましたように、37年にはもう世界的に有名になっているわけですが、戦争中ですね、やはり国威発揚が必要だったわけです。そういう背景がありまして、文

化勲章を授章したのです。

そして49年に（ついでながら関係ないんですけど、私が生まれたのも1949年です）、ノーベル賞を受賞されました。このノーベル賞受賞は日本全体に実に衝撃的な出来事でした。ここに書きました文章、これは岡本道雄京大元総長が、我々の基礎物理学研究所の創立25周年のときに述べたあいさつの一節です。この1949年、もちろん戦後の間もないころで、戦後疲弊したこの日本で、日本人がノーベル賞を初めてもらったと。これは画期的なことだったわけですが、そのときの雰囲気非常によく伝えている文章です。ちょっと読んでみますが、これは名文ですね。「戦後の窮乏の明け暮れの中に疲れることのみ多い毎日を送っていましたが、『1949年ノーベル物理学賞、日本の湯川教授に』との新聞報道は、同じく科学研究に携わる私どもに衝撃的感動を与えました。その夕べの帰途に見た時計塔の灯（これは京大の時計台の時計の灯ですが）は、吉田山を背景にくっきり浮かび上がって見えました。ひとり科学者のみでなく、日本国民全体は自信喪失の首を初めて伸ばし、世界をかいま見る気持ちを味わったのでした」という、こういう文章を見ますと、本当に、そのころの日本人の感激というのが伝わってきます。

とにかく、そういう意味で画期的なことだったわけですが、学問的な観点から言いますと、この湯川の中間子論というのは、素粒子論という新しい学問を創始したわけです。ともすれば我々不注意に発言しますと、湯川も朝永も素粒子論という分野でいい仕事をしたという表現をするわけですが、それは全く違ってまして、そのころにすでに素粒子論という学問があったわけじゃなくて、むしろ彼らが素粒子論をつくり出したわけです。

それで特に湯川の論文は、新しい実体、パイ中間子という、未知の粒子を予言したわけです。さらに、この場の量子論という新しい理論が、これは電磁気学に対して開発された理論なんです。電磁気学にとじない非常に一般的な方法として適用できることを示したのです。その場の量子論を適用して、未知の粒子、中間子を導入したのです。さらに、この世界では力というものと、これからまた説明します場というものと、そして粒子というもの、これらは皆同じものであると。カイコール場イコール粒子である、という基本的な考え方です。それを確立した。そういう意味で、この湯川の中間子論というものは非常に意味を持っています。

ところが、湯川自身も、決して彼の中間子論を最終的な、本質的な理論だと思っていなかった。彼の中間子論は強い相互作用の本質的な理解ではなくて、多分現象論的な理解だということを理解していました。その強い相互作用の本質的な起源は一体なんだろうか。さらに、先ほど言いましたように、彼の企図というのは統一理論です。素粒子のあらゆる相互作用を理解したい、そういう統一的な理解はどういうふうに行うのか。これが湯川の宿題だったわけです。それが一番最初に言いましたように、非常に困難の戦いの末、40年後に、1970年代の半ばに素粒子の標準模型というのが確立しました。その理論によりまして、素粒子世界の基本的な相互作用が、ある意味では本質的にわかったわけです。その理解の仕方がゲージ原理という、これがきょうの一番説明したいことなんです。ゲージ原理という非常に単純な原理です。

それによって、この世界の、自然世界の相互作用のすべてが理解できるということがわかったわけです。これを説明したいと思います。

そのプロセスで、そういう標準模型の確立のプロセスで重要な役割をしたのが、朝永先生がつくり出した「くりこみ理論」です。くりこみ理論といいますのは、先ほど場の理論というものが基本的な理論だと言いましたが、場の理論は実際に使おうとしますと、途端に無限大の困難というのが出てきます。その無限大の困難をどういうふうに対処すればいいのか、その扱い方を示したの

が、このくりこみ理論というもので、それを使うと初めてこの無限大の処理ができて、数学的に正しい予言ができるようになります。

この朝永さんのくりこみ理論というのは量子電気力学ですね。電氣的な力に対して開発された理論ですが、実はこれがすべての相互作用に対して適用できることが最終的にはわかったわけです。このくりこみ理論の業績によって、朝永先生はシュウィンガーとファインマンという人たちと3人で1965年にノーベル賞を受けます。

これも本題とは関係ないんですが、1965年というのは私の高校2年生のときでありまして、この朝永先生のノーベル賞は非常に感銘を受けました。非常に残念だったんですが、それまでは日本人のノーベル賞受賞者は湯川先生だけで、心ひそかに2番目のノーベル賞受賞は自分だと思っていたんです。しかし2番目を越されたから3番目になろうと半ば冗談ですけど思っていました。(笑)

それで、1950年代になりますと、実は素粒子というのはどんどん、どんどん増えます。湯川のころは、素粒子というのは自然界には、ほんの少ししか素粒子はなかったわけです。力を媒介する粒子としては光です。光というか、電磁波ですが、それから重力を媒介する重力子と、それから物質場としては陽子と中性子。これは原子核の中にある陽子と中性子です。それから、その陽子と中性子なんかを結びつける、湯川さんのパイ中間子。それ以外には電子とニュートリノ、これしかなかったわけです。

1950年代「素粒子」の増殖

- 力 γ (光子)、G (重力子)
- 物質
 - p (陽子)、n (中性子): バリオン
 - $\Rightarrow \Lambda, \Sigma, \Delta, \Xi, \Omega, \dots$
 - π (π 中間子): メソン
 - $\Rightarrow K, \rho, \omega, \phi, \dots$ (数百種類!)
 - e (電子)、 ν (ニュートリノ): レプトン
 - $\Rightarrow \mu, \nu_\mu, \tau, \nu_\tau$

図 10

物質の最小構成単位

原子核: 陽子 (u, u, d), 中性子 (u, d, d)

クォーク: u, d, s, b, t, c

レプトン: e, μ , τ

π⁺ = u \bar{d}
π⁻ = d \bar{u}

図 11

ところが、1950年代になりますと、加速器というのが開発されまして、それで実験しますとどんどん、どんどん新しい粒子が出てくる。この陽子と中性子の仲間として、 Λ (ラムダ)、 Σ (シグマ)、 Δ (デルタ)、 Ξ (グザイ)、 Ω (オメガ)、、、、ギリシャ文字を全部使っても足りないぐらい、どんどん、どんどん出てくるわけです。こういう仲間をバリオンといいます。

それで、さらに湯川さんのパイ中間子の仲間も、K 中間子、 ρ (ロー) 中間子、 ω (オメガ)、 ϕ (ファイ) といって、どんどん、どんどん出てくるわけです。こういう仲間を中間子、あるいはメソンといいます。こういうバリオンたちやメソンたちは、合計数百種類出てきます。数百種類出てくると、もはや素粒子とは思えないわけですね。バリオンとかメソンというのは、すべて強い相互作用をする粒子たちです。それに対して、電子とかニュートリノは強い相互作用をしない。これをレプトンといいますけども、レプトンも実は仲間が出てきて、それは先ほど言いました宇宙線の中に見つかったミュー粒子です。それは実は電子の仲間だったのです。だから

強い相互作用をしません。

それから、さらにその相棒というか、その上に τ (タウ) レプトンというのが見つかります。実はレプトンというのはこれだけで、電子と μ (ミュー) 粒子とタウ粒子ですね。それぞれその電子のニュートリノ相棒 ν_e 、ミュー粒子のニュートリノ相棒 ν_μ 、それからタウ粒子のニュートリノ相棒 ν_τ と、これだけ合計6個で、レプトンはこれで終わりです。

ところが、この強い相互作用をするバリオンとメソンは数百種類あります。これをどう理解するかということで、ここでも日本人が非常に重要な役割をします。このバリオンとメソンに対して、一番最初に、それまで素粒子と思われていたものは実は素粒子でなくて複合模型といますが、それより下のレベルの粒子が存在して、その束縛状態としてバリオンとかメソンが出てくるんです。そういうアイデアを出したのは坂田昌一先生です。これは湯川先生の共同研究者であり弟子だった坂田博士ですが、坂田模型、あるいはゲルマンとツヴァイクがクォーク模型というのを提出しまして、南部陽一郎先生らが、クォークがカラーという自由度を持っていることが強い相互作用の起源であると言ったのです。

そういういろんな歴史的な研究がありますが、結局わかったことは、バリオンというのはクォーク q という、より下のレベルの基本構成子が3体ですね、三つ集まって結びつけられたものであると。それから、メソンというのは、クォーク q とその反粒子、 q バーと書いていますが、クォークと反クォークが束縛されたものがメソンだという理解になります。

一方、強い相互作用をしないレプトンは、依然として今も素粒子です。それで、ちょっと絵を見せます (図11) と、先ほど言いましたように、原子核の中に中性子と陽子があるわけですが、この中性子は素粒子じゃなくて、今言いましたように、クォークの3体の束縛状態です。実はクォークは6種類あります。クォークが6種類ということも、また日本人の、私の先生であります益川敏英博士と小林誠先生です。小林・益川モデルと言われていますが、彼らはクォークは実は6種類あるということを予言しました。名前がついてまして、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップクォークという6種類があるわけですが、この中性子はアップクォーク1個とダウンクォークが二つだと。これ、色がちょっと見にくいかもしれませんが、色はいつもちょうど3色違うものが入っているのです。それから、陽子のほうもアップクォークが二つとダウンクォーク一つなんですが、これも3色違うものが入っている。湯川さんの予言した π^+ 中間子自身はアップクォークと反ダウンクォークの束縛状態で、 π^- 中間子はダウンクォークと反アップクォークの束縛状態、というふうに理解されます。

それで、そのクォークにはこういうふうにカラーがあります。だから、アップクォークという1種類のクォークに対しても実はカラーが三つありますので、3種類あって、実はクォークというのは6種類とカラー三つで都合18種類あるわけです。現在の物質に対する基本的な理解は、図12に示しました。この自然世界の物質粒子はこれですべてです。アップクォーク、ダウンクォーク、チャームクォーク、ストレンジクォーク、トップクォーク、ボトムクォーク、この6種類でさらに3色ずつあって18種類であると。

それから、強い相互作用をしないレプトンというやつは電子とミューオンとタウ粒子がありまして、それぞれにニュートリノ相棒がある。これが物質粒子のすべてであります。電気を持っている粒子の間には電氣的な力が働くわけですが、その電氣的な力を媒介するのは光。だから、電磁相互作用を媒介するのは光で、それと全く同じ意味で、3色の色の自由度、この3色が強い相互作用についての電荷のような、電気量のような役割をしますが、この色に結合して強い相互作用

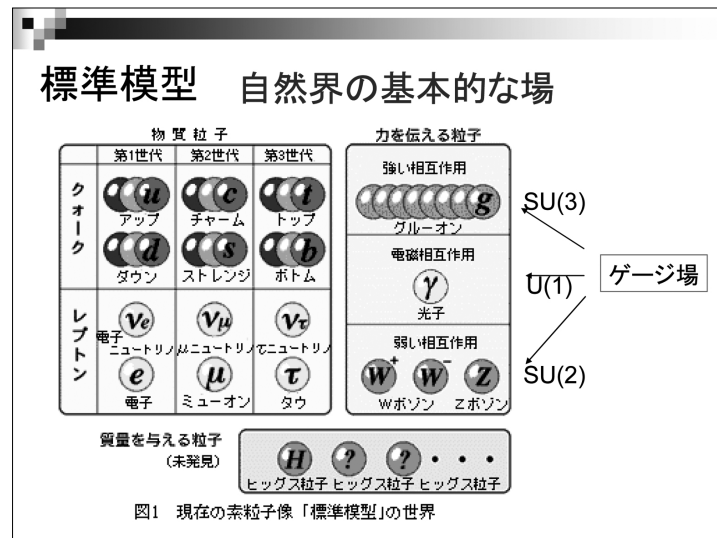


図 12

用を媒介する粒子がグルーオンと呼ばれていまして、 $3 \times 3 - 1 = 8$ 種類あります。

それから、この弱い相互作用というのは W^\pm ボゾンとか Z ボゾンといわれる粒子が媒介しまして、これは合計三つあります。これらの強い相互作用と、電磁相互作用、弱い相互作用を媒介する場というのがゲージ場と呼ばれているわけで、このゲージ場が、ここにちょっと恐縮なんです、群の言葉でSU(3)とかU(1)とかSU(2)とかいう、そういう群に対応するゲージ場だと言うんですが、この3とか1とか2とかいう所を理解してください。この3というのはカラーが三つあり、この三つの色を混ぜ合わせる回転に対応したゲージ場がこの強い相互作用。それから光というのは電気量、電気量は1種類なので1というのがついてます。それからこの弱い相互作用のほうは、今ここに、電子とそのニュートリノ相棒と、ミューオンとそのニュートリノ相棒といった具合に、二つずつペアになってます。それから、クォークのほうも、アップクォークとダウルクォーク、チャームクォークとストレンジクォーク、というふうに2つずつペアになっています。この2つずつというのは意味がないわけじゃなくて、このSU(2)の2という意味です。これらのペアの2成分の間の回転に対応する W^\pm ボゾンと Z ボゾンの三つのゲージ場ですね、それが弱い相互作用を媒介しています。

そういう理解が現在の標準模型における理解ですが、ここでもう少しまとめますと、我々の自然界には相互作用は実は四つしかありません。(図13) 一つは、先ほど言いました原子核の中で働いている強い相互作用。それから、電気を持っている粒子の間に働きます電磁相互作用です。これは皆さんよくご存じです。それから、フェルミのときに言いましたけども、不安定な粒子は勝手に崩壊するわけですが、そういう崩壊を引き起こす弱い相互作用です。そして最後に、我々毎日経験しています重力相互作用です。そういう四つの相互作用しか、この自然界には存在しません。この四つの相互作用、それぞれ関係する人たちの写真をつけましたが、この四つの相互作用が実はすべてゲージ相互作用である、というふうに現在の標準模型では理解されているのです。

さっきから何回か出てますけども、その強い相互作用は3成分のカラーを源にするような、SU(3)のゲージ理論であり、電磁相互作用というのは、電荷＝電気量を源にするようなU(1)のゲージ理論。それから、弱い相互作用というのは、先ほど2階建てと言いましたが、2成分＝2階

自然界の4つの力＝相互作用

- 強い相互作用
- 電磁相互作用
- 弱い相互作用
- 重力相互作用



Yukawa
Faraday
Maxwell
Fermi
Newton
Einstein

図13

自然界の4つの力＝ゲージ相互作用

- 強い相互作用
＝3成分カラーを源にするSU(3)ゲージ理論
- 電磁相互作用
＝電荷を源にするU(1)ゲージ理論
- 弱い相互作用
＝2成分弱isospinを源にするSU(2)ゲージ理論
- 重力相互作用
＝エネルギーを源にする一般相対性理論




図14

建ての量を回転するような、SU(2)のゲージ理論。それから、重力相互作用というのは、その源はエネルギーです。エネルギーを源にするような、一般相対論とありますが、これもゲージ理論です。

ということで、この標準模型の成立によって、我々の自然界のすべての力というのは、結局ゲージ相互作用であるということがわかったわけです。それはファイマン図でかきますと、図14の図です。何か粒子が飛んできまして、ある点で、波線であらわしましたゲージ場というものを放出します。このゲージ場の交換が力を引き起こすわけです。そのゲージ場にこのSU(3)ゲージ場とかU(1)ゲージ場とかSU(2)ゲージ場とかがあって、あるいは重力子のゲージ場がある。それが自然界のすべての力の起源であると、そういう理解に達したわけです。

それで、今、いろいろゲージ理論だとかゲージ場とか呼んでいますが、今日ヤン・ミルズのゲージ理論と呼ばれるものを作った人が、この楊（ヤン）という人です。この人はパリティの非保存を提唱して31歳でノーベル賞をもらっています。この写真は、おとしし82歳になった楊教授で、ここですが、その左隣が私です。朝永さんが量子電気力学に対してくりこみ可能性を証明してノーベル賞をもらいましたが、このヤン・ミルズ理論というのは基本的には量子電気力学と同じゲージ理論ですが、もう少し難しい理論になっています。それに対して、くりこみ可能性を証明して、このトフーフとフェルトマンという人達がノーベル賞をもらった。それが99年です。

ヤン・ミルズゲージ理論



C.N. Yang - R. Mills
1954 (31歳)
1957



82歳のYang教授 (2005年)



't Hooft



Veltman

ヤン・ミルズゲージ理論のくりこみ可能性 1999ノーベル賞
朝永らのくりこみ理論の拡張

図15

南部陽一郎 1921年生

- 自発的対称性の破れ 1960 ⇒ クォーク、ゲージ場の質量生成
- カラー自由度の導入 1966 ⇒ 強い相互作用の起源
- ひも模型 1970




基研研究会「学問の系譜」(2005年)

図16

それからさらに、南部陽一郎先生、現在まだかくしゃくとなさっていますが、南部先生は非常に重要な仕事をされています。カラーの自由度が強い相互作用の起源であるということを最初に言われたのも南部先生ですし、それからひも模型という最近の統一模型でストリング理論というのがありますけども、その先駆けとなった論文を出しておられます。それから、標準模型の成立に決定的な重要な「自発的対称性の破れ」の概念を初めて素粒子論に導入されました。南部先生がまだノーベル賞を受賞されないのは不思議です。

これから残りの15分ほどで、このゲージ理論というのは結局どういうものかということを説明したいと思います。今までなるべく式を使わなかったんですが、ちょっとだけ式を使わせてください。場というのをこれまでいっぱい言ってきましたが、もうちょっと場というのは何かと説明しますと、電場とか磁場は皆さんご存じだと思います。例えば電気量がある点にありますと、その周りに電氣的な場ができる。あるいは、磁石を持ってきますと、磁極の回りに磁場ができる。これらはよく知られた場の例です。場というのは、ですからこの空間全体に、時空の各点、各点に何かある量が存在している。そういうものを「場」と一般に言います。

記号ではちょっと $\psi(x)$ (プサイ) と書かせてください。xというのは時空の座標です。本当はこの時間、空間というのは、空間は我々3次元空間ですから、x座標、y座標、z座標と、三つ座標が必要です。さらに時間tというのがありますから、時間まで入れますと四つ座標が必要ですが、それをひっくるめてxと書きます。だから、ここにxと書いたのは時空の点を表しており、その上にある量 $\psi(x)$ が存在しているのです。それを場と呼ぶわけです。

これは1成分かのように書いていますが、例えば電場、あるいは磁場というのは3次元における場ですから、向きがあるわけです。そうすると、実は3成分量、3成分のベクトル場になります。ですから、この場 $\psi(x)$ も実は1成分のように書いていますが、たくさんの成分をあらわしているかもしれないと思っておいてください。

それで、この場というものの基本的な性質は、場は必ず「波として伝搬する」という性質です。それはどうしてかといいますと、非常に単純でありまして、場というのは隣り合う点の場の大きさをそろえようとする傾向があるのです。そうしますと、ある点で場の大きさが変動したとします。そうすると、ある点で大きくなりますと、その隣の点はそれに引っ張られて、それになるだけ大きさをそろえようとするからです、ある点で大きくなりますと、その隣の点ではそれに追いつこうとする。そうすると、またその隣の点もそれに追いつこうとする。またその隣の点も、、、というふうになります。ところが、ある点で振動しますと、隣の点が追いついたら、またこっちが小さくなり、また隣が小さく追いつこうとするわけです。それが隣り合った点でどんどん、どんどん起こりますから、波が外側に伝わっていくというふうに、単に隣り合う点の場の大きさをそろえようとする傾向があるだけで、必ず波として伝搬するということになります。

それで、そろえようとするときに、ある点、時空点の点xと、その隣の点x+dxで、場の強さをそれぞれ、 $\psi(x)$ 、および $\psi(x+dx)$ と記します (dxは小さな距離です。) が、この大きさの差を計算しましょう。

この場の大きさの差 $d\psi(x) = \psi(x+dx) - \psi(x)$ は、もちろんこの時空の点のこの距離dxに比例します。その比例係数はこの場プサイの微分や微係数と言われる量ですが、これ、今、空間方向がx y zと、それから時間方向tとありますから、x方向、y方向、z方向、t方向のそれぞれの微分を引くくめて $\partial\psi(x)/\partial x^\mu$ と、こんな記号で書きます。

自然界の運動というのは、作用と呼ばれるある量が最小になるという原理ですべての運動が決

まっています。その原理のことを最小作用原理といいます。そういう考え方からしますと、隣り合う点の場の大きさをそろえようとする傾向があるということは、この作用という量の中に、場の隣り合う点の変化分をカウントするような、この微分に比例した項が作用という量の中に入っているということです。それをちょっと覚えておいてください。

それで、ここが今日の一番大事なところですが、ゲージ原理。このゲージ原理といいますのは、時間、空間の各点、各点で場が存在するわけですが、その場を図る座標軸は、時空の各点、各点で勝手に設定してもよろしいと、それを認めることですね。それがゲージ原理です。時空の各点、各点で、場を図る座標軸は勝手に設定してよくて、どんな設定の仕方をしていても物理法則は常に同じ形に書ける。これを認めることがゲージ原理です。これは一見非常に簡単な原理で、これはア・プリオリに認めてもよからうという気がします。これを認めますと、今から言いますように、ゲージ場という力を媒介する場が存在しないといけないということと同時に、その存在するゲージ場が物質場と、どういう相互作用をするかも決まってしまう。それを説明したい。

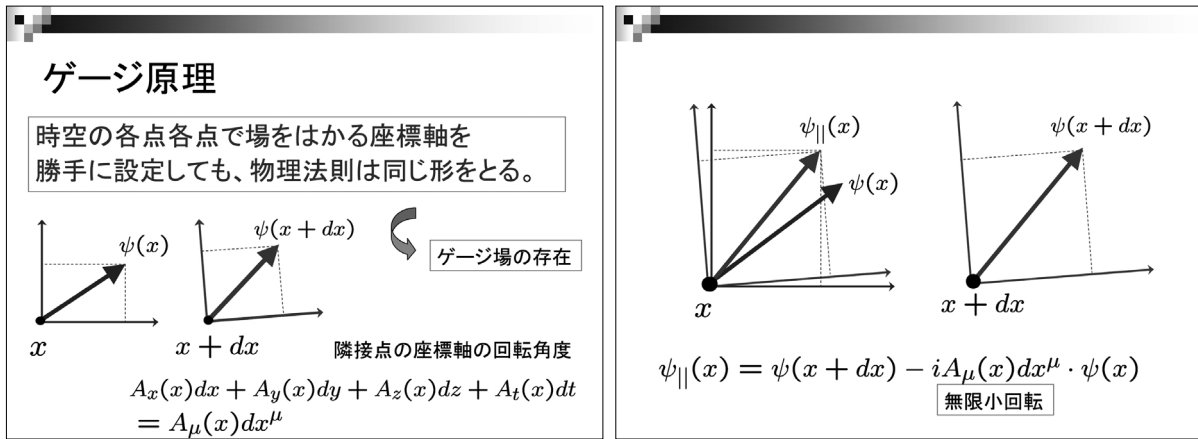


図 17

図 18

まず、これを認めますと、ゲージ場が存在しないといけないということがこういうふうになります。時空の x の点で、この場の量をはかる。これ今、1 成分のように書いてますけど、さっき言いましたように、一般に何成分かの量ですが、それをはかる座標軸です。こういうふうに平面に書きますと 2 成分のように見えますが、場を図る座標軸が、点 x ではこういう青の（左側の）座標軸が設定されている。その隣の点 $x+dx$ で設定されている座標軸は、この x の座標軸とはちょっとずれているでしょう。この赤の（右側の）座標軸。そうすると、この点 x の青い座標軸と点 $x+dx$ の赤い座標軸が、どれだけずれているかということを、一般にはどれだけ回転しているか、その回転の角度、を指定する必要があります。それを指定する量が実はゲージ場 $A(x)$ なのです。この x 方向に dx だけずれたときには、もちろんその座標軸の回転角といいますのは、必ず dx という短い距離に比例します。だから、 $A_x(x)dx$ のように dx という因子を出してきますが、その前の係数 $A_x(x)$ ですね、これが x 方向にずれた座標軸がどれだけ回転しているかということをあらわす量です。それから、 y 方向にちょっとずれたときに、どれだけ座標軸がずれているかを表す $A_y(x)$ 、それから z 軸方向にずれたときの $A_z(x)$ 、さらに、時間軸方向にちょっとずれたときにどれだけ回転するかの、 $A_t(x)$ 。この $A(x)$ という量は、 $A_x(x)$ 、 $A_y(x)$ 、 $A_z(x)$ 、 $A_t(x)$ というふうに 4 成分あります。これは時空が四次元だからですね。時間が 1 成分、空間が 3 成分だから、この回転をあらわす量も必ず 4 成分あります。ですから、我々これを 4 成分ベクトル場といいます。だ

からこの回転をあらわすゲージ場も4成分のベクトル場です。この $A_x(x)$ 、 $A_y(x)$ 、 $A_z(x)$ 、 $A_t(x)$ を引くくめて $A_\mu(x)$ と書きますが、この4成分場が存在しないといけない。

これがゲージ場です。しかも、このゲージ場が存在しないといけないということと同時に、物質場とどういう相互作用をするかということが決まります。それを説明しますと、まず波としての性質を言うときに、 x の点の場とその隣の $x+dx$ の点の場、これの差を計算して、どれだけずれているかということを評価しないといけないわけですが、図18のように $x+dx$ の点の場を x の点へ平行移動して持ってきます。ところが点 $x+dx$ の赤の座標軸と点 x の青い座標軸とはずれてますから、直接赤いベクトルと青いベクトルを比較しても、それぞれ参照している座標軸が違うので、これを直接成分で比較してもだめです。ですから、この平行移動で持ってきた赤い場の量は、この赤い座標軸じゃなくて、この点 x に存在している青い座標軸を参照した成分に書きかえる必要があります。このときに、赤い座標軸から青い座標軸への回転が必要になります。その回転は、先ほど言いましたゲージ場で与えられますから、結局、この隣の点の場を点 x に持ってきた場は、そこの青い座標軸を参照して、図18の $\psi_\parallel(x)$ の表式となります。そこの右辺第2項の $A_\mu(x)dx^\mu$ に比例した部分が座標軸の無限小角の回転による項です。

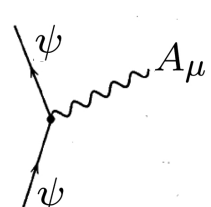
ですから、隣の点の場との比較をするときには、第一項の部分は普通の微分を出しますが、常に第2項が起源の $A_\mu(x)$ というものが付随します。ここまで、1成分で回転を書いてますけど、実は例えば場 $\psi(x)$ が2成分だとしますと、この前の回転をあらわすゲージ場 $A_\mu(x)$ は2行2列の行列ですが、これは行列を知っている人だけが適当に理解してください。

それで、先ほど言いました作用という量ですね。作用という量を最小にするように、自然界の力は働くんだと。作用という量の中に、先ほど言いましたように、波という性質は隣り合った点の場の大きさをそろえようとする傾向があるので、必ず微分ですね、隣同士の場の変化率、差を計算する微分の項 $\partial\psi(x)/\partial x^\mu$ があるんですが、座標軸もずれているので、必ずその微分にはこの回転の項、 $-iA_\mu(x)\psi(x)$ というゲージ場比例項が付随する。この組み合わせ $\partial\psi(x)/\partial x^\mu - iA_\mu(x)\psi(x)$ を「共変微分」といいます。作用の中でこの共変微分項に掛けられる相棒としてはいろいろありますが、ここでは、この場自身の複素共役、 ψ^\dagger （プサイダガー）が掛けられている場合を書きますと、作用は図19のようになります。

作用 $\rightarrow \psi^\dagger(x) \cdot \left(\frac{\partial\psi(x)}{\partial x^\mu} - iA_\mu(x)\psi(x) \right)$

$= \psi^\dagger(x) \cdot \frac{\partial\psi(x)}{\partial x^\mu}$ 運動項

$- i\psi^\dagger(x) \cdot A_\mu(x)\psi(x)$ 相互作用項



ゲージ原理から
相互作用の仕方も決まる

図19

それで、第1項の $\psi^\dagger \partial \psi(x) / \partial x^\mu$ は先ほど言いましたように、波を引き起こす運動項と言われるものです。第2項の $-i \psi^\dagger(x) \cdot A_\mu(x) \psi(x)$ ですが、これが先ほど言いましたゲージ場の項です。そこでは物質場は $\psi^\dagger(x) \cdot \psi(x)$ がついています。古典的には時間、空間の各点、各点である量になっているのが場ですけれども、場の量子論に行きますと、場の量というのは、実はこの点 x において、このプサイであらわされる粒子をつくる演算子、あるいは消す演算子になります。そうしますと、この項 $\psi^\dagger(x) \cdot A_\mu(x) \psi(x)$ というのは、どんなことをあらわしているかといいますと、ファイマン図で言いまして、 x という点でプサイという粒子が消されて、そのときに A_μ というゲージ場の粒子がつくられ、同時に、プサイという粒子もつくられるという相互作用です。

ですから、波として伝搬するこの運動項がありますと、同時に必ずこういう相互作用項が存在するわけで、これがこの物質粒子とゲージ場の相互作用をあらわしているわけです。ですから、ゲージ原理を見てみますと、ゲージ場が存在し、ゲージ場 A_μ が存在して、なおかつそれが物質場 ψ と、こういう相互作用をするということまで決まってしまう。

世の中には弱い相互作用と、電磁相互作用と、強い相互作用とがあったんですが、弱い相互作用は、先ほど言いましたように、2階建ての量に対する回転でしたから、このゲージ場は2行2列の行列になります。図20を見て下さい。先に、クォークでアップクォーク u とダウンクォーク d と言いましたが、その2階建て成分の回転に対応するのが弱い相互作用のゲージ場です。

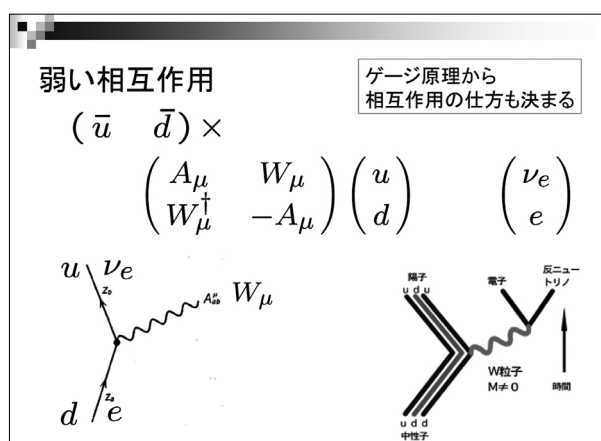


図20

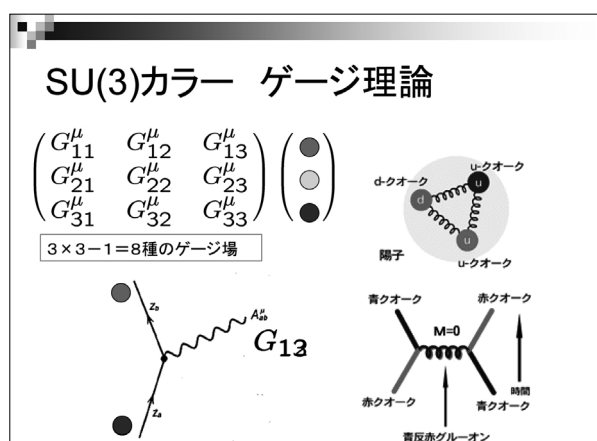


図21

このゲージ場を考えますと、行列の掛け算について知識がある人は、このWというゲージボゾンがダウンクォーク d に掛けられて、上成分アップクォーク u になることがわかります。だから、このファイマン図に描いたように、 d クォークに W ボゾンがカップルして u クォークになる相互作用です。同時に、アップクォーク、ダウンクォーク以外にも、レプトンの電子 e と、そのニュートリノ相棒 ν_e も同じく2成分を組むので、ここにダウンクォーク、アップクォークのかわりに、電子とニュートリノという、こういうファイマン図も存在します。こういう図と、先ほどの図を2回使いますと、図20右側の図ができます。このダウンクォークがアップクォークになり、 W ボゾンを放出し、その W ボゾンが電子とニュートリノをつくるという過程です。中性子というのは先ほど言いましたように、アップクォーク、ダウンクォーク、ダウンクォークの束縛状態であり、陽子というのは、アップ、ダウン、アップの束縛状態ということですが、その中のクォークに対して W ボゾン交換によるこういう相互作用がありますと、結局中性子が陽子になり、同時に電子と反ニュートリノを放出するという、ベータ崩壊を記述します。フェルミの弱

い相互作用は、こういう形でゲージ相互作用として理解できるわけです。

これは、このWボソンをパイ中間子に置きかえますと、一番最初の湯川さんの提唱した弱い相互作用の理解にちょうど一致しているわけです。

それから先に、強い相互作用の起源はカラーだと言いました。それを最初に指摘したのは南部陽一郎先生だと言いましたが、どういう意味かといいますと、カラーは3種類であるわけですが、そのカラーの3成分に対して、これを回転する回転のゲージ場は3行3列ですから、9成分ですが、ちょっと説明しにくい理由によって、1個引かないといけないんで、 $3 \times 3 - 1 = 8$ 種類のゲージ場があります。図21を見ますと、このゲージ場がこのカラーにかかりまして、例えば G_{12} という成分は行列の掛け算で、第2成分にかかって、第1成分になるから、黄緑が赤になって、このゲージボソン G_{12} を放出する。あるいは、もうちょっと違った成分をみますと、青が赤になるのはここですから G_{13} を放出するとか、いろんな相互作用があるわけです。この8種類の強い相互作用のゲージ場Gにはグルオン（糊粒子）という名前をつけてますが、グルオンを交換すれば、クォークの間に強い相互作用が働くということが理解できるのです。

もう早く終わらないといけないんですが、そういうふうに1970年代の中葉に、自然界のすべての相互作用がゲージ相互作用だということがわかった、理解できたわけです。ただ未だ、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、は強さが違う別々の相互作用なんです。図22を見て下さい。縦軸に力の強さの逆数を書いています。ですから、相互作用が強いほど下なんですが、強い相互作用の大きさはここら辺、弱い相互作用がこれぐらい。U(1)の相互作用がこれ位なんで、我々が実験しているエネルギー領域（縦の破線）ではこれぐらいの力の差があるわけです。

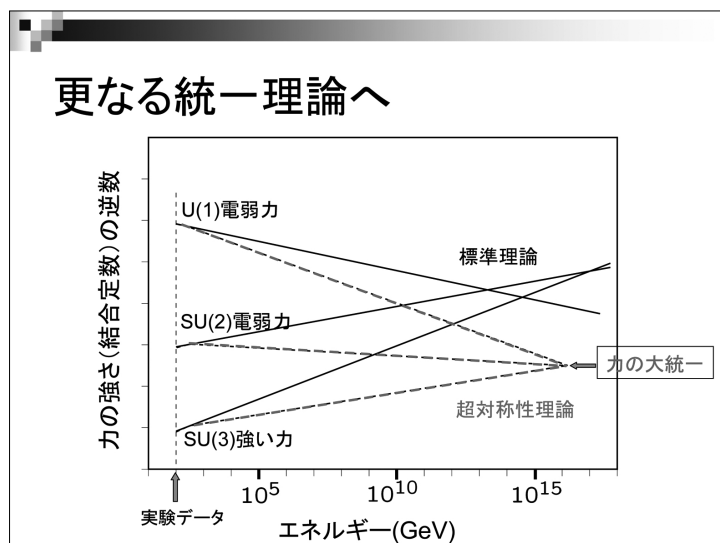


図22

ところが、エネルギーをどんどん、どんどん上げていきますと、実は強い相互作用はだんだん、だんだん弱くなる。だから、この図では上に行きます。それからSU(2)の弱い相互作用の強さはこれぐらい。それから、電磁相互作用はどんどん強くなりまして、ずっと下がってくる。実は、ものすごいエネルギーの高いところに行きますと、今我々が全然違った相互作用として見ている強い力、弱い力、それに電磁力ですね、それらがものすごいエネルギーの高いところに行きますと、実は全く同じ強さになるという傾向があります。しかも、このすごいエネルギーのところに行きますと、ここには描いてないんですが、重力相互作用ですね。重力相互作用もほとんど同じ

大きさになります。これは何を表しているかといいますと、実は自然界に存在している先ほどの四つの相互作用ですね。強い力と電磁力と弱い相互作用、それから重力相互作用と。その四つの相互作用は、実は全く同じ強さになる。

ということは、自然界のすべての力が単一の起源から出ているということがわかるかもしれない。そういうステージに我々はあるわけですが、その最有力候補というのが、現在、超弦理論、あるいはスーパースtring理論と言われているものですが、現在のstring理論というのはそこら辺を研究している。そういう最終的な、統一的な理解に達すれば、そこで湯川あるいは朝永が我々の世代に残した宿題に対して最終的に答えられると、そういうことだろうと思います。

どうもご清聴ありがとうございました。(拍手)

終わり

